

亜鉛・アルミ溶射による鋼橋防食について



所属名：島根県
松江県土整備事務所
発表者：企画員 遠藤 徹

Key Word：ニッケル系高耐候製鋼材、亜鉛・アルミ溶射、飛来塩分量、LCC

1. はじめに

1.1. 発表の概要

一般県道久城インター線鴨島大橋の建設にあたり、防食仕様を当初ニッケル系高耐候性鋼材としていた。ところが、上部工発注準備段階の差し迫った状況でこのニッケル系高耐候性鋼材の防食性能を超えと思われるほどの高い飛来塩分量が報告された。

本発表では、限られた時間と観測データをもとにニッケル系高耐候性鋼材の適否を判断し、代わってLCCに優れる亜鉛・アルミ溶射を採用した事例を報告する。

なお、鴨島大橋は旧塗装系にて検討されている。

1.2. 久城インター線の概要

久城インター線（以下「本線」という）は、高速交通ネットワークの形成と市内の渋滞解消を目的とし、国土交通省の整備する「益田道路」および益田市の整備する「中吉田久城線」と連携して平成13年度より事業着手した。そして、平成19年3月には一部供用を開始し、現在は平成21年頃の全線開通を目指して事業を進めている。（図－1参照）

1.3. 鴨島大橋の概要

鴨島大橋（以下「本橋」という）は、本線の一般河川高津川を渡河する橋梁であり、本線中最も大きな構造物であるうえ、供用開始対してのクリティカルパスとなっているため、完成の遅延が許されない橋梁であった。

鴨島大橋の概要

形式：鋼6径間連続少数钣桁橋（PC床版）

延長：L=395m

鋼重：W=1,439t

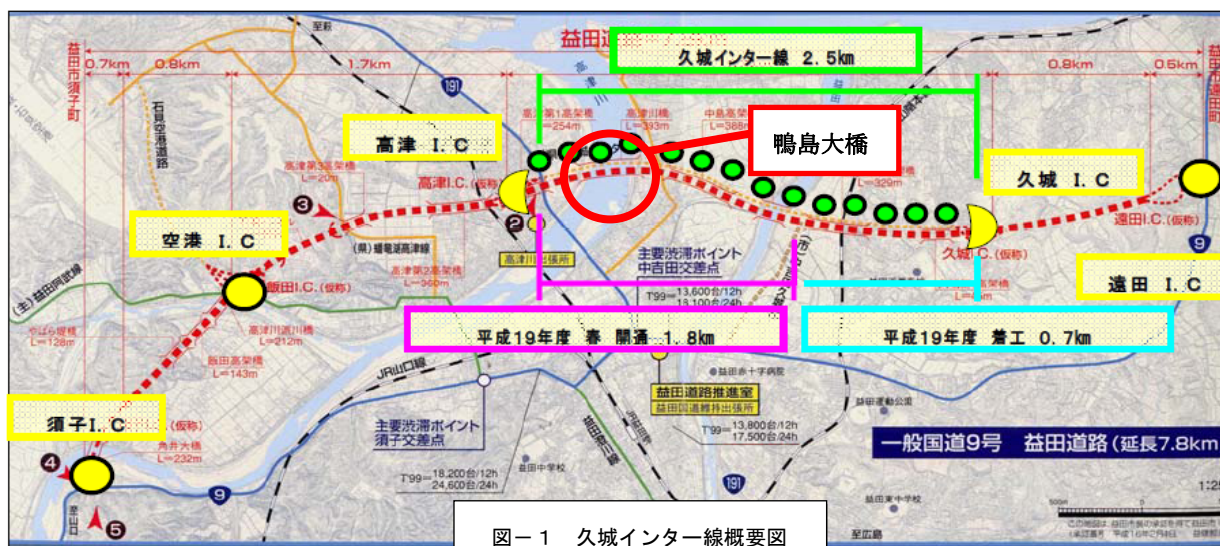
整備期間：平成15～19年度

2. ニッケル系高耐候性鋼材の適用の判断

2.1. ニッケル系高耐候性鋼材の特徴

ニッケル系高耐候性鋼材はニッケルなどで調性し、防食性能を高めた耐候性鋼材である。その防食性能は飛来塩分量0.4～0.6mdd (mg/d(dm²=10cm²)/day：メーカー推奨値)程度（普通耐候性鋼材は0.05mdd程度）といわれているが、気温、湿度、地形などによって左右されるとも言われており、現時点で明確な基準がないのが実情である。

本橋においては、島根県道路事業設計要領の飛来塩分量分布図から0.4mdd (0.3～0.4mdd:図－2参照)以



図－1 久城インター線概要図

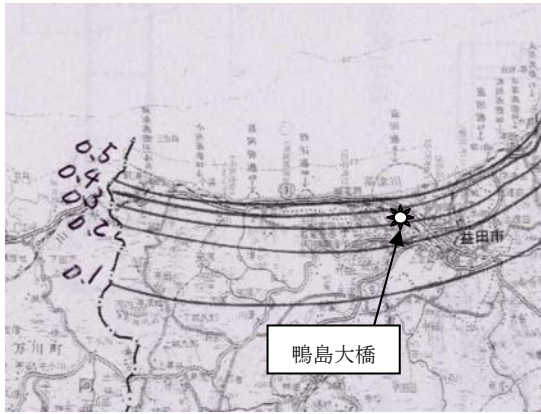


図-2 飛来塩分分布図

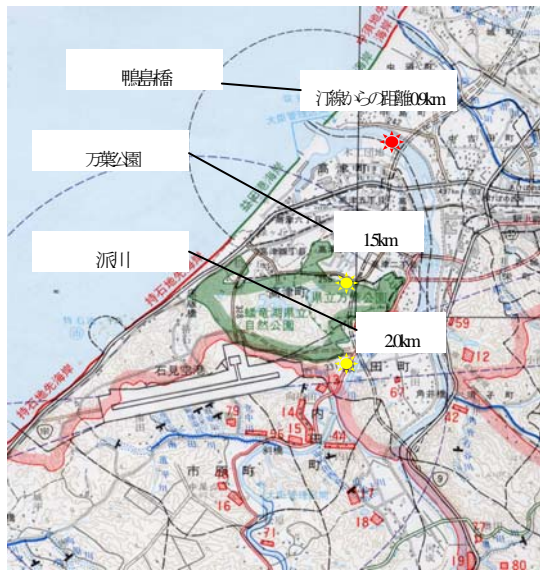


図-3 飛来塩分観測箇所

下であることを確認し、さらに耐候性用表面処理を行ったうえ、ニッケル系高耐候性鋼材を採用することとしていた。

2.2. 予想を上回る飛来塩分量

ところが、発注準備を進めていた平成15年12月に、鴨島大橋より約1km上流で飛来塩分量調査を行っていた国土交通省から、異常に高い飛来塩分量を観測した旨連絡があった。(図-3参照)そこで、早速本橋架設地点で観測を行ったところ、同様に異常とも思える高い値が観測され、ニッケル系高耐候性鋼材の防食性能を超えることも考えられた。(表-1参照)

本来、耐候性鋼材などの採用の是非を判断するためには、少なくとも1年分の飛来塩分で算定した飛来塩分量の値を用いる。これに対し、高津川橋梁では早速観測を開始したものの、2ヶ月分の観測データしか収集できていなかった。一方、久城インター線の開通時

期などを考慮すると、ニッケル系高耐候性鋼材の採用の可否を即座に判断しなければならない状況であった。

2.3. 統計手法を用いた判定

そこで、観測データの不足を補うため、直接的な飛来塩分量の予測をあきらめ、①飛来塩分量がニッケル系高耐候性鋼材の一応の限界とされる0.5mdd程度を大きく超えるかどうか。②橋梁架設地点が概ねどの程度の環境であるか。の2点について間接的な評価することとした。

①においては、現時点で得られた2ヵ月間の観測データについて、島根県道路事業設計要領の飛来塩分量分布図が正として、統計処理を行ってその出現確率をもとめた。その結果、観測された平成16年2月のデータは、本橋架設地点では数百年に一度、さらに0.6km上流の万葉公園では百年に一度の出現確率であることが判明した。

一方、②については、近辺の既存塗装系橋梁の腐食状況調査を行った。その結果、架設地点より300m上流のやや厳しい腐食環境に適用されるB系塗装の橋梁において10～20年の割合で頻繁に塗り替えていることから、架設地点はC系塗装すなわち厳しい腐食環境(表-2参照)であると推測した。

以上の2つの結果から、ニッケル系高耐候製鋼材の適用はできないものと判断した。なお、本橋発注後も継続して本橋架設地点の飛来塩分量調査を行ったところ、年間平均飛来塩分量は1.32mddを観測した。

表-1 各観測地点の飛来塩分量 単位:mdd

	H15.10月	11月	12月	H16.1月	2月	3月
橋梁架設地点(0.9km)					2.07	0.56
万葉公園(1.5km)					0.68	0.32
派川(2.0km)	0.20	0.89	0.26	0.62	0.33	0.28

表-2 防食法別推定対応年数

	B-1	C-4	亜鉛溶射	亜鉛・アルミ溶射	耐候性鋼材
一般環境	20年	60年	100年	—	100年以上
やや厳しい環境	15年	45年	70年	—	100年以上
厳しい環境	10年	30年	60年	90年	—

(鋼橋のサイクルコストP19抜粋)

3. 亜鉛・アルミ溶射の採用

3.1. 新たな防食仕様の選定

ニッケル系高耐候製鋼材が適用不可能となったこと

から、一般的に本橋では前述の環境からC系塗装を採用することとなる。しかし、道路橋示方書で橋梁における耐久性の目標期間については100年を目安とすることが示された。^{注1}これに対し、当該環境でのC系塗装は文献(表一2参照)や周辺の既設橋梁の状況から30年程度の耐久年数と推測された。

一方、本橋が高速ネットワークを構成し道路としての重要度が高いこと。1級河川高津川を渡河することから、塗り替え作業が容易ではないこと。などの理由から、塗装形式の選定をより慎重に行う必要があると判断した。

このため、100年を目安として塗り替え費用を含めたライフサイクルコスト(以下「LCC」という)を前提に、C-4系塗装と近年採用例が見られるようになった。亜鉛アルミ溶射の比較検討を行った。

3.2. 亜鉛・アルミ溶射の特徴

橋梁で一般的に採用される防食対策は主に図-4に示す5種類がある。このうち、溶射は約100年前に日本に導入されており、北海の海底石油掘削用鋼構造物など極めて厳しい環境にも利用されているが、高価なため普及していなかった。しかし、溶射技術自体の改良やLCCが注目されるようになったことから、近年、採用例が増えている。溶射の防食性能は、溶射する合金に亜鉛・アルミ合金(図-5参照)を採用した場合には、亜鉛およびアルミの被膜効果に加え、亜鉛による犠牲防食効果があり、一般塗装に比べ傷に強いなど優れた性能をもつ。また、材片試験の結果ではあるものの、耐久年数が60年程度(於:厳しい環境)と長く、「LCC」に優れた塗装といえる。また、既存の塗装との組み合わせる場合もあり、重防食塗装(フッ素など)と組み合わせ

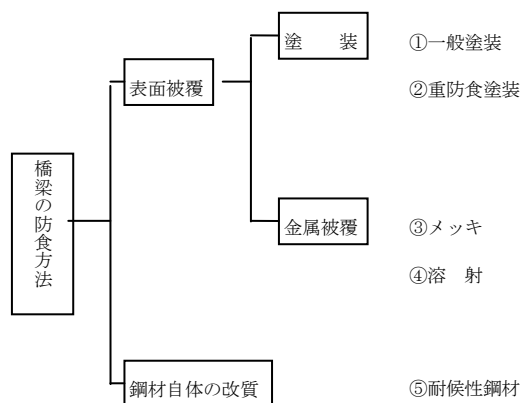


図-4 橋梁の主な防食方法
鋼道路橋塗装・防食便覧(P1-18加筆)

ると90年程度の耐久年数を持つとされている。しかし一方で、依然高価であるうえ新しい技術であるが故に明確な仕様が定まっていないことや、実績において不利な点がある。また、狭隘部には溶射できないなどの固有の欠点を持っている。溶射は、使用する金属や溶射方法によってかなりの種類があるが、使用する金属は亜鉛・アルミ合金で溶射方法は、フレーム溶射(合金溶射:図-6参照)もしくはアーク溶射(擬合金溶射)の採用例が多い。なお、鴨島大橋では、施工実績が多い亜鉛・アルミ溶射およびフレーム溶射のうえにフッ素樹脂塗装を採用している。

一般環境	やや厳しい環境	厳しい環境
飛来塩分の影響を受けず自動車の排気ガスや工場の煤煙を強く受けない田園、山間部	飛来塩分の影響を受け、自動車の排気ガスや工場の煤煙を強く受ける都市部、工業地帯など	潮風が強く、飛来塩分の影響を強く受ける海上、海浜地区および高温多湿帯など
一般環境 ←←←	溶射金属材料	→→→ 塩害環境
亜鉛 亜鉛・アルミニウム合金	亜鉛・アルミニウム合金	アルミニウム アルミニウム・マグネシウム合金

図-5 溶射に使用する金属^{注2}

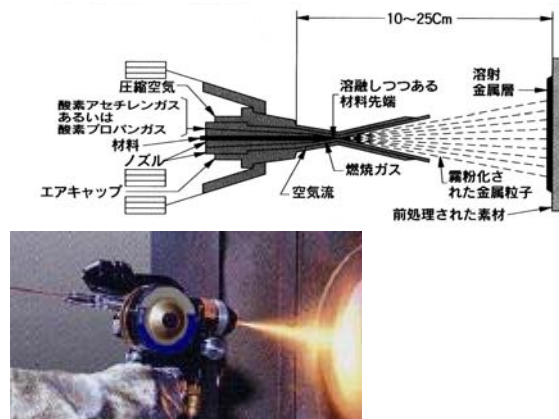


図-6 フレーム溶射概念図および写真

3.3. 防食仕様の比較検討

耐久性の目標年数の目安が100年を目安と定められたものの、実際にはその検討手法は明確なものがなく、比較を行ううえで様々な個別の判断を行う必要があった。一方、一般的にLCCを考慮する場合には、維持費のみならず更新費を含めるうえ、床版や支承など部材について個別に検討すべきものである。しかし、今回は、比較の対象が防食仕様であることから、防食仕様のみを検討の対象とすることとした。

そして、比較する仕様として以下の3種類を選定した。

- ①C-4塗装(フッ素樹脂)

②亜鉛・アルミ溶射+封孔処理

③亜鉛・アルミ溶射+封孔処理+C-4系塗装

さらに、塗り替えまでの期間を「鋼橋のライフサイクルコスト」などを参考にして、本橋における環境で比較した結果は図-7のとおり、③「亜鉛・アルミ溶射+C-4（フッ素）」が最も有利となった。なお、比較ではケレン（既存塗装や錆びの剥ぎ取り作業）について、従来一般的な2～3種ケレン（電動工具等で行うケレン）でなく、現在は主流となりつつあるが当時まれな1種ケレン（図-9参照）とした。さらに、図-7では社会的割引率を考慮していないが、この割引率を導入しても結果に変化はなかった。なお、参考までに仮にニッケル系高耐候製鋼材が使用可能として橋梁上部工建設費を含む比較結果を図-8に示す。



図-9 プラスト作業(1種ケレン同等作業)

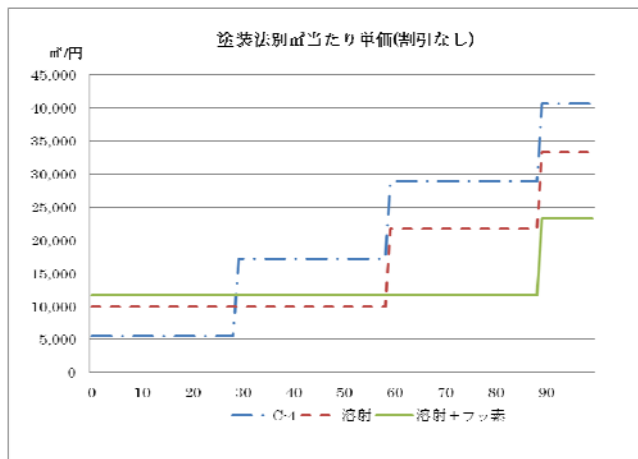


図-7 塗装法別㎡当たり単価

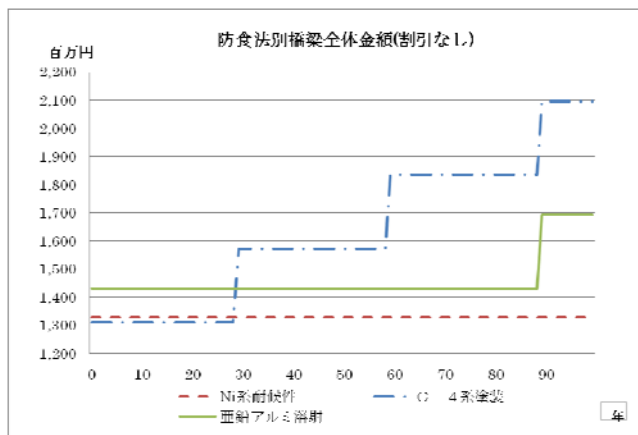


図-8 防食法別橋梁全体金額

表-3 鴨島大橋における亜鉛・アルミ溶射塗装仕様

【一般部】	
亜鉛(85)・アルミ(15)合金溶射	100 μm
エポキシ樹脂系封孔処理剤	160g/㎡
エポキシ樹脂下塗り	300g/㎡
フッ素樹脂塗料	170g/㎡
フッ素樹脂塗装	140g/㎡
【狭隘部・ボルト部】	
超圧膜型エポキシ樹脂	300 μm
エポキシ樹脂下塗り	60 μm
フッ素樹脂塗料	30 μm
フッ素樹脂塗装	25 μm

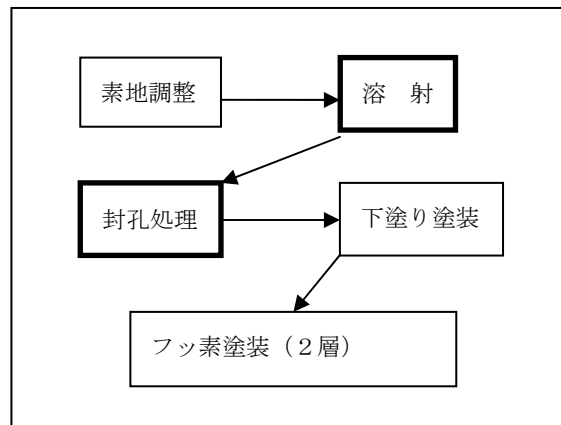


図-10 鴨島大橋における表面被覆手順

3.4. 亜鉛・アルミ溶射の施工

本橋における亜鉛・アルミ溶射の仕様は表-3の通りとなっており、施工は現場溶接部やボルト部を除きその大部分を工場でおこなっている。溶射は施工器具が比較的大きくスプレー状に吹き付けることから狭隘部やボルト

トなどで影ができる箇所には施工できない。そのため、特にボルト部においては亜鉛メッキボルトを使用しうえ超圧膜型エポキシ樹脂を用いて耐久年数を確保した。

一方、一連の溶射および塗装の施工手順は図-10に示す通りで、一般的な塗装で言えば溶射は高級な無機ジ

ングリッチプライマー的なものであるとしたほうが理解しやすい。また、溶射表面が多孔質なため「封孔処理」を行って間詰めを行う必要がある。

実際の施工においては、現場溶接部において行った現場溶射では、素地調整のブラスト作業で周辺への影響が思いのほか大きかった。また、ボルト部での超圧膜型エポキシ樹脂の施工性が悪く、幾度となく手直しをする必要があった。その他、工場塗装（図-11参照）であることから運搬時などにおける溶射の欠損に対し、補修方法等の基準が定まっていなかったことから、溶融亜鉛メッキの基準などを参考に独自にこの基準を定めなければならなかった。しかし、溶射自体には特段の困難もなく順調な施工となった。



図-11 溶射作業の状況(機械施工)

4. まとめ

4.1. 鋼道路橋塗装便覧の変更における影響

本橋における今回の検討は平成17年12月に改定前に行われたものであり、現在再度検討すると多少状況が異なるものと思われる。それは、前述にもある通りLCCが重要視されるようになったことから、フッ素塗装(C-5)や1種ケレン(Rc-I)が仕様化^{注3}されて1種ケレンの費用が検討当時比して安価となったためである。

このため、現時点で社会的割引率を考慮した場合に本橋における環境では、C-4塗装と亜鉛・アルミ溶射の差はほぼなくなる結果となる。しかし、一方でC-4塗装は100年の間に少なくとも数回の塗替え作業が必要であることから、桁等の鋼材の健全性に疑念が残るほか、今後増大する維持更新費の平準化に対し、溶射は有効な技術であると推測され、溶射の優位性は保っているもの

と思われる。

4.2. 溶射に望まれる改善点

今回、亜鉛・アルミ溶射を採用して、当初の印象よりは、比較的順調な施工であったものの、計画から設計、施工を通して携わった発注者として以下の点について改善を望みたい。

1. 経済性の確保
2. 溶射の仕様の確立
3. 狭隘部やボルト部での溶射の可能化
4. 防食性能の更なる検証

4.3. あとがき

溶射は防食性能に優れ厳しい環境に対応できるなど優れた技術であるものの、経済性に劣ることから耐候製鋼材やコンクリート系構造の採用が可能であればその優位性が減少する。今回の検討でも仮に耐候製鋼材が採用可能であれば塗装はもちろんのこと溶射も淘汰される。このことから、溶射は限られた環境や条件でしか採用できないこととなる。一方、今後問題となる維持更新費の増大を考慮すると、既設橋梁の塗替えにおいて、溶射は有効な工法であり、前述のとおり今後の維持更新費の平準化に寄与するものと思われる。また、個別に橋台・杓回りや下フランジなどの腐食しやすい部位への対応や、塗替え時環境負荷の大きい1種ケレンが施工不可能な橋梁に有効な技術になるものと思われる。このことから、今後のとも包括的なLCCの低減の取組とともに溶射技術の一層の向上に期待したい。



図-12 鴨島大橋を左岸から望む

注1：道路橋示方書・同解説I・II (H14.3:P7)

注2：防食溶射協同組合資料

注3：鋼道路橋塗装・防食便覧 (H17.12:P II-30,92)